

УДК 532.516, 517: .536.24

**М. А. ГОТОВСКИЙ**, д-р техн. наук; гл.н.с. ОАО «НПО ЦКТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия;

**Ю. Г. СУХОРУКОВ**, канд. техн. наук; зам. ген. дир. ОАО «НПО ЦКТИ»;  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург,  
Россия;

**Н. В. ГЕОРГИЕВСКИЙ**, зам. дир. ЗАО «Завод «Киров-Энергомаш»,  
Санкт-Петербург, Россия

### **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ СРЕД С ВЫСОКИМИ ЧИСЛАМИ ПРАНДТЛЯ В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА ОТ ЛАМИНАРНОГО К ТУРБУЛЕНТНОМУ РЕЖИМУ ТЕЧЕНИЯ**

В теплообменниках с высоковязкими средами реализуется движение с числами  $Re$ , соответствующими ламинарной и переходной областям для гладкого канала. При этом использование искусственной шероховатости (ИШ) дает возможность получать степени интенсификации тем большие, чем больше число  $Pg$ . Для объяснения этих результатов важно установить отличие развития турбулентности в интенсифицированном канале от гладкого. Новые данные Хао, Эволда и Олсена позволили установить, как быстро после перехода к турбулентности распределение пульсаций поперечной скорости и касательных напряжений с ростом числа  $Re$  приближается к установившемуся. Зона порождения турбулентности в гладком канале расположена в интервале  $30 < y^+ < 40$ . Сопоставление масштабов ИШ, приводящих к снижению  $Re_{кр}$  и положения этой зоны в гладкой трубе, позволили сделать вывод, что зона образования вихрей для ИШ оказывается ближе к стенке, чем при генерации турбулентности по обычному сценарию. Это дает основания предполагать, что влияние генерируемых на элементах ИШ вихрей, будет сильнее влиять на теплоотдачу жидкостей с высокими числами  $Pg$ , поскольку для них основное термическое сопротивление сосредоточено в относительно тонком слое. Изложенная схема позволяет объяснить экспериментальные данные ряда авторов, а также обеспечить более надежное прогнозирование эффективности интенсификации теплообмена в зависимости от числа  $Pg$ .

**Ключевые слова:** искусственная шероховатость, интенсификация теплообмена, число Прандтля, турбулентность.

#### **Введение**

Проблема интенсификации теплообмена для сред с высокой вязкостью, для которых характерны высокие значения числа Прандтля является достаточно сложной. Дело в том, что для таких сред трудно достичь высоких скоростей движения из-за непереносимого роста потерь давления. Поэтому теплообменные аппараты с такими средами (например, смазочными маслами) работают чаще всего при переходных значениях чисел Рейнольдса. Ряд полученных для этих условий результатов был опубликован в работах [1, 2]. В этих работах рассматривались экспериментальные и расчетные результаты исследования теплоотдачи и гидродинамики таких движений. Экспериментальные результаты для высоковязких сред были получены в основном для труб с поперечной и спиральной накаткой и лишь в одной из них исследовалась олуноченнная труба. Это расчетное исследование, проведенное в работе [2].

#### **А) Анализ опытных данных**

1) Три упомянутых выше типа искусственной шероховатости (ИШ) можно объединить в общую группу, которая характерна тем, что рельеф формируется с помощью внешнего давления.

2) При достаточно большом масштабе ИШ критическое число Рейнольдса (Re) может уменьшиться до величин заметно меньших 1000. В этом случае существует диапазон чисел Re, простирающийся до верхней границы переходной области, который характеризуется высокой тепловой эффективностью, которая оказывается особенно большой для высоких чисел Прандтля.

3) Этот эффект можно использовать, в частности, для совершенствования теплообменников высоковязких жидкостей.

### Б) Компьютерные исследования

Возможно, впервые был проведен цикл численных расчетов теплоотдачи при ламинарном течении высоковязкой жидкости с высокими числами Pr в плоском канале с олуненными стенками [2]. Характерной особенностью постановки указанной задачи был учет зависимости вязкости от температуры, которая для жидкостей подобного типа является, как правило, достаточно сильной. При этом было показано, что в подобных условиях высокие степени интенсификации теплообмена имеют место даже при числах Re порядка нескольких сотен. Этот результат оказался особенно интересным, учитывая то обстоятельство, что аналогичные эффекты наблюдались в опытах по исследованию теплоотдачи масла в трубах с плотной кольцевой накаткой.

### 1 Некоторые результаты исследования структуры турбулентного потока

Для лучшего понимания результатов важно было определить возможные изменения характера перехода к турбулентности при переходе от гладкого канала к каналу с интенсифицирующим рельефом. Начнем с рассмотрения результатов исследования скоростного поля в области перехода от ламинарного к турбулентному течению, проведенного в работе [3]. Ниже приведены два рисунка из этой работы (рис. 1, 2).

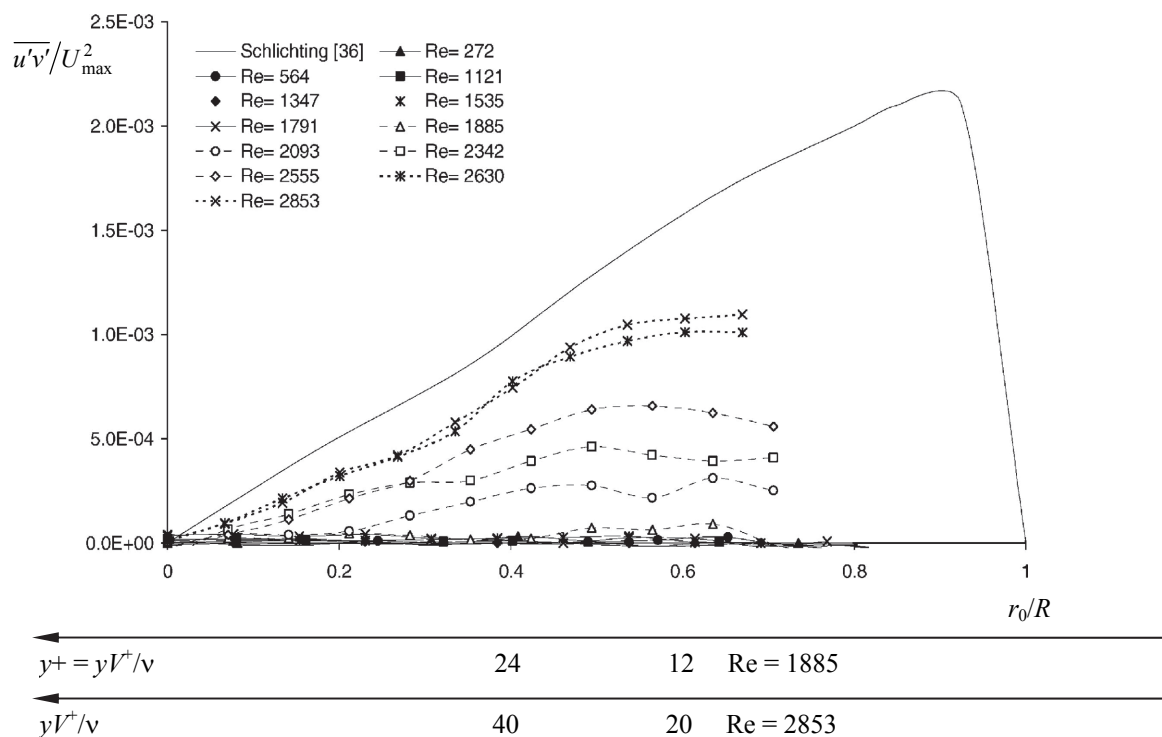


Рис. 1 – Зависимость безразмерные касательных рейнольдсовых напряжений  $\overline{u'v'}/U_{\max}^2$  от  $r_0/R$  и числа Рейнольдса (Re)

В ней исследовались как осредненные, так и пульсационные характеристики течения воздуха в трубе. Интервал исследований был выбран таким образом, чтобы максимально проследить развитие турбулентности.

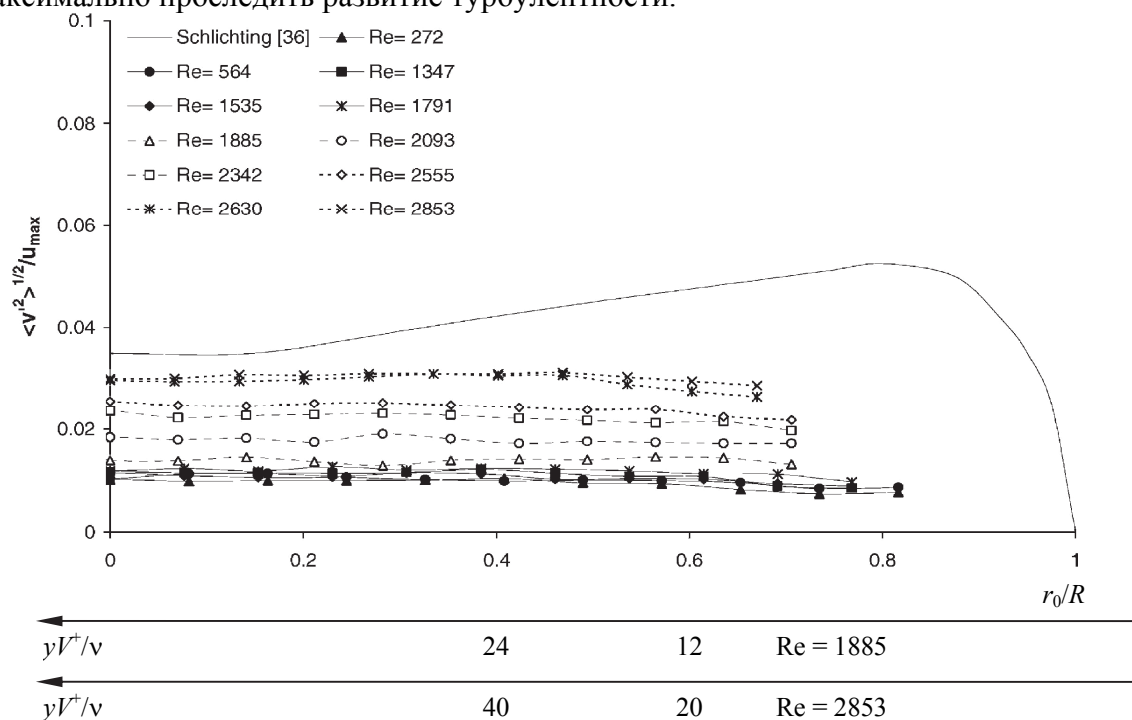


Рис. 2 – Флуктуации поперечной составляющей скорости  $\langle v'^2 \rangle^{0.5} / U_{\max}$  от  $R$  и  $V^+$

## 2 Характер изменения теплоотдачи при различных числах Прандтля

Иллюстрацией вышесказанного являются некоторые характеристики теплоотдачи в переходной области, которые представлены на рис. 3 совместно с гидродинамическими величинами. Дадим теперь краткие пояснения к рис. 3.

На рис. 3 сопоставляются опытные и расчетные данные для двух существенно отличных чисел Прандтля –  $Pr = 3$  и  $Pr = 100$ . До величин числа Рейнольдса, близких к критическому ( $Re_{кр}$ ), экстраполирована формула Петухова-Кириллова (1) и показаны кривые, по формуле Гнилинского (2), которая по существу представляет собой формулу (1), которая скорректирована путем замены числа  $Re$  в числителе на  $(Re - 1000)$ .

$$Nu = \frac{\zeta/8 Re Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\zeta/8} (Pr^{2/3} - 1)}; \quad (1)$$

$$Nu = \frac{\zeta/8 (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\zeta/8} (Pr^{2/3} - 1)} \left[ 1 + \left( \frac{d}{L} \right)^{2/3} \right]. \quad (2)$$

Эта коррекция была введена именно для того, чтобы расчетную формулу для теплоотдачи можно было использовать в переходной области. Сравнение этих кривых показывает масштаб отклонений величины коэффициента теплоотдачи от его значений, соответствующих установившимся характеристикам турбулентности.

За исключением близкой окрестности  $Re_{кр}$  формула (2) действительно хорошо согласуется с опытными данными. При числах  $Re$ , близких к  $Re_{кр}$  мы можем наблюдать резкое падение теплоотдачи для  $Pr = 100$ . Формально этой линии в общем «некуда деваться», поскольку при ламинарном течении зависимость теплоотдачи от числа  $Pr$

резко ослабеваает вплоть до полного исчезновения для очень длинных труб. Однако, интересно проследить, как это изменение связано с изменением других характеристик течения, не зависящих напрямую от числа  $Pr$ . Для этого на рисунке приведены еще две

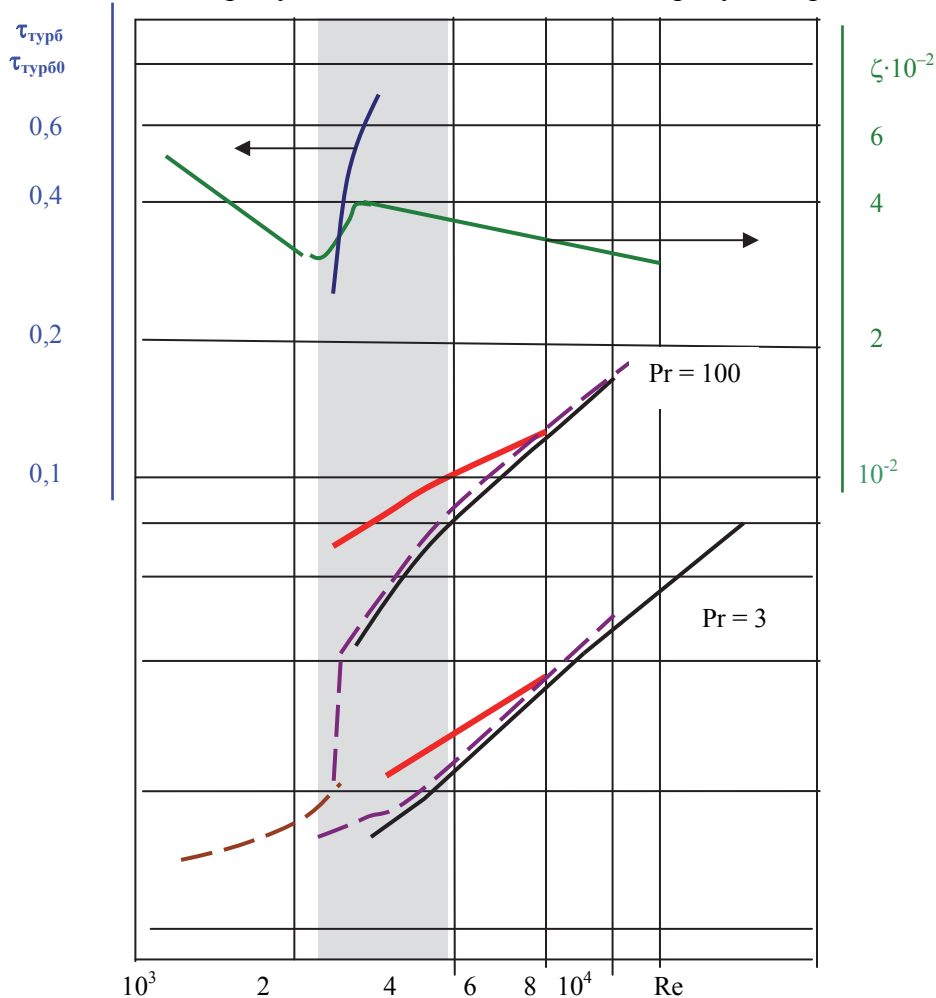


Рис. 3 – Общая схема, поясняющая изменение теплоотдачи в переходной области для различных чисел Прандтля для гладкой трубы:  
 — опытные данные (турбулентное и переходное течение); — опытные данные (ламинарное течение); — формула Гнилинского [4]; — формула Петухова-Кириллова [3]; — коэффициент сопротивления; — относительная доля турбулентных касательных напряжений

кривые. Первая из них – это зависимость коэффициента сопротивления от числа  $Re$ . Вторая характеризует рост рейнольдсовых напряжений вслед за переходом от ламинарного к турбулентному движению. Для этого использованы опытные данные, приведенные в работе [5]. Из рис. 1 видно, что этот рост происходит весьма быстро и уже при  $Re \sim 2800$  они превышают  $2/3$  от уровня, соответствующего приведенной там же кривой для развитой турбулентности. Здесь мы сталкиваемся с интересным обстоятельством. С одной стороны для не слишком высоких чисел  $Re$  механизм образования турбулентности связан с выбросом в поток из пристенной области порций жидкости (*puffs*). Для иллюстрации этих процессов ниже приведены заимствованные из работы [6] схематические картины порождения турбулентности, полученные в известной работе Корино и Бродки [7] (рис. 4).

Рис. 4, наряду с результатами корреляционного анализа пульсаций скорости, также указывают на то, что зона генерации турбулентности расположена на участке  $y^+ = 20 \dots 40$ . Основной областью «порождения» турбулентности является интервал  $y^+ \sim 20-30$ . Но для рассматриваемых величин чисел  $Re$  эта область оказывается достаточно далеко от стенки ( $r/R \sim 0,8$ ). Это видно из рис. 1, 2, где параллельно с координатами  $r/R$  добавлены координаты  $y^+$ . Может встать вопрос: возможна ли реализация подобных форм более крупных масштабов? Результаты моделирования турбулентных течений в широком спектре линейных размеров каналов говорят о том, что возможна. Кроме того, результаты прямых визуальных исследований в переходной области, в том числе и достаточно «свежих», подтверждают наличие подобных форм.

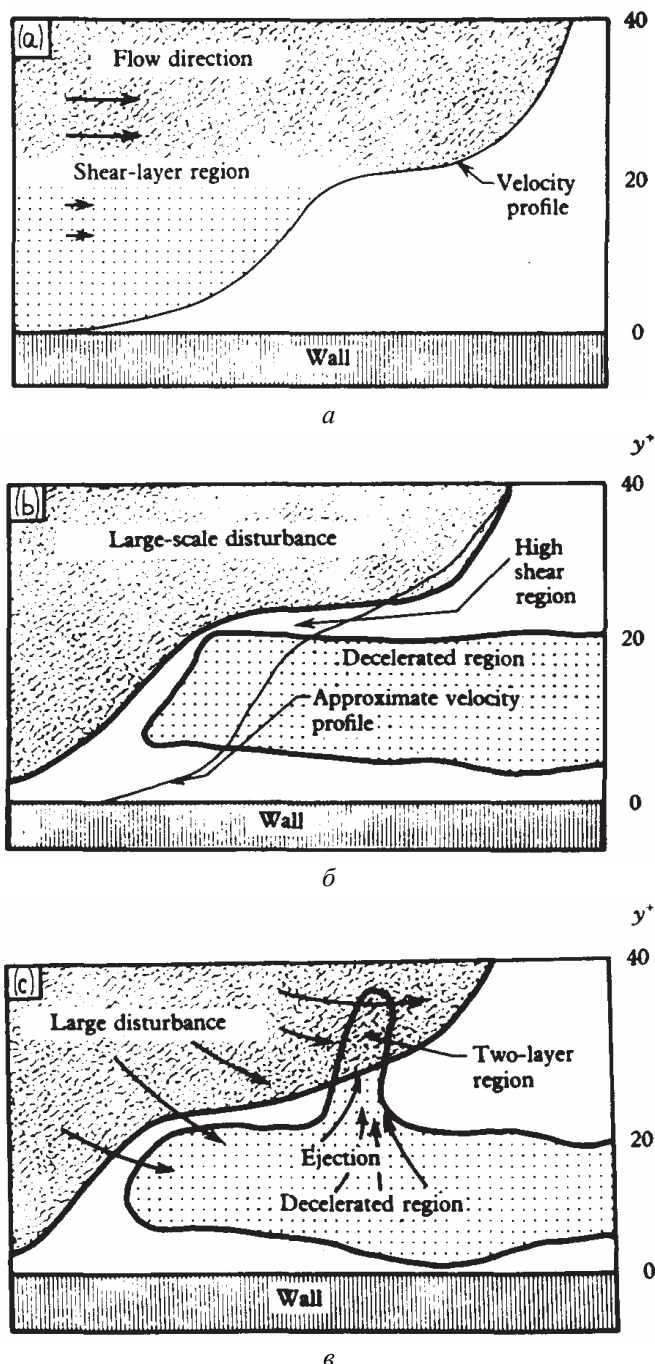


Рис. 4 – Схема движения в пристенном слое согласно работе [7].

- а – формирование области низких скоростей вблизи стенки,
- б – появление крупномасштабных возмущений,
- в – эжектирование и образование двухскоростной зоны

нии генерирует определенный спектр вихрей, который создает аналогично турбулентности некоторое поле вихревых коэффициентов переноса (вязкости, теплопроводности и диффузии). Как и при анализе турбулентного переноса встает вопрос об их соотношении, которая в значительной степени определяет эффективность использования ИШ

Таким образом, вырисовывается следующая картина. Еще достаточно слабые возмущения типа выбросов, пронизывая пристенную область, обеспечивают тем не менее, такой уровень интенсификации, который достаточен для его проявления в жидкостях с высоким числом Прандтля, то есть при весьма низком уровне переноса теплоты по сравнению с переносом импульса.

### 3 Способ приближенного учета влияния искусственной шероховатости

Перейдем теперь к рассмотрению влияния ИШ. Набор элементов искусственной шероховатости при их обтекании

прежде всего для повышения эффективности теплообменных аппаратов. Учитывая тему настоящей статьи, мы прежде всего будем говорить о средах с высокими числами  $Pr$  (т.е. для высоковязких сред).

В работах ряда авторов (например, [8, 9]) уже достаточно давно на основе анализа экспериментальных данных был сделан вывод о том, что при высоких масштабах ИШ наблюдается снижение критического числа  $Re$ . Этот эффект иллюстрируется рис. 5. Нас этот вопрос интересовал в отношении каналов интенсифицированных с помощью *ARPD* (*Artificial Roughness by Pressure Deformation*). Можно сделать вывод, что для заметного снижения  $Re_{кр}$  необходимо иметь масштаб ИШ  $\sim 0,15R$  или несколько больше.

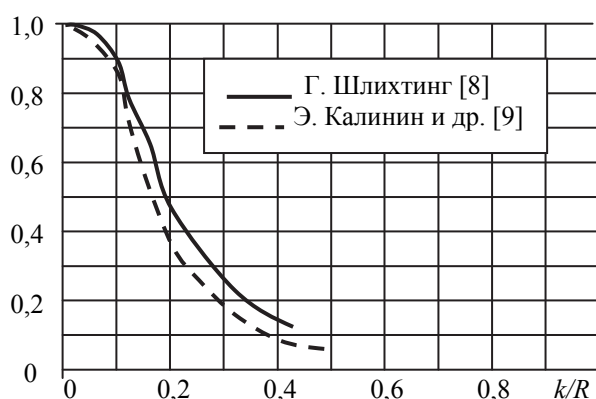


Рис. 5 – Зависимость  $Re_{кр}$  от относительной шероховатости

Если обратиться к этому варианту интенсификации, то, сопоставляя эту величину с данными, приведенными на рис. 1, 2, 6 мы увидим следующее. Зона образования вихрей на элементах ИШ оказывается ближе к стенке, чем зона максимальной генерации турбулентности по обычному сценарию. Таким образом, можно предполагать, что влияние вихрей, генерируемых на элементах ИШ будет в большей степени влиять на теплоотдачу жидкостей с высокими числами  $Pr$ .

Теперь взглянем на опытные данные работы [10] по интенсификации теплоотдачи. Для исследованной трубы очевидным образом имело место снижение критического числа Рейнольдса. При этом мы можем наблюдать семейство кривых относительной теплоотдачи, которая сильно растет с увеличением числа Прандтля. Но при переходе в область  $Re > Re_{0кр}$  расслоение по числу  $Pr$  исчезает. Это можно интерпретировать следующим образом. В этой области начинает преобладать обычный механизм турбулизации, поскольку зона порождения турбулентности оказывается ближе к стенке, чем вершины элементов шероховатости. Интенсификация теплоотдачи перестает зависеть от числа  $Pr$  в большей степени, чем для гладкого канала (например, по формуле (2)).

Из рис. 1 при рассмотрении его с осью абсцисс  $y^+$  видно, что при относительной ИШ  $\sim 0,2$  и более, что соответствует снижению критического числа Рейнольдса, зона генерации турбулентности за счет ИШ оказывается значительно ближе к стенке, чем зона естественной генерации, которая расположена в интервале  $y^+ = 20 \dots 40$ . Для теплоносителей с  $Pr \sim 1$  эта дополнительная генерация сказывается лишь на части толщины теплового пограничного слоя (ТПС), в то время, как для высоких чисел Прандтля она воздействует на всю толщину ТПС, поскольку он значительно тоньше. Таким образом, мы можем ожидать, что относительная интенсификация теплообмена за счет ИШ в области переходных чисел Рейнольдса будет выше для теплоносителей с высокими числами Прандтля, что и наблюдается в экспериментах.

В связи с приведенными данными можно отметить еще один интересный факт, связанный с рассматриваемыми эффектами. В недавно опубликованной работе [11] отмечается, что число  $Re \sim 770$  согласно экспериментальным данным можно

рассматривать как максимальную границу существования турбулентных структур в потоке. Несколько меньшее, хотя и близкое по порядку величины значение максимального снижения числа  $Re_{кр}$  можно обнаружить при анализе данных для теплоотдачи и сопротивления интенсифицированных труб, приведенных в работе [12].

Надо заметить, что характер генерации турбулентности распределенными элементами ИШ, возможно способствует такому снижению.

Так для данных, приведенных на рис. 5, эта величина приблизительно равна 300. Заметим, что для  $Pr = 150$  подъем теплоотдачи проявляется при числе  $Re \sim 200$ , т.е. как бы до перехода к турбулентности. Однако, если обратиться к результатам, приведенным на рис. 1, 2, то видно, что небольшие пульсации скорости наблюдаются для значений числа  $Re$  несколько меньших, чем значение аттестуемое как  $Re_{кр}$ . Возможно, что теплоноситель с числом  $Pr = 150$  уже реагирует на такие пульсации. Но наиболее существенным является следующий вопрос. В какой мере свойства этой «преждевременной» турбулентности будут подобны тем, которые проявляются при «естественной».

Традиционное рассмотрение проблемы влияния ИШ на теплоотдачу обычно базировалось на подходе, идущем от классической работы Никурадзе [13], в которой считалось, что шероховатость не оказывает прямого влияния на критическое число Рейнольдса. Однако, уже в 50-х – 60-х годах прошлого века появились работы, в которых исследовались такие масштабы ИШ, при которых имеет место существенное снижение  $Re_{кр}$  [14]. В них рассматривались как одиночные элементы ИШ в пограничном слое, так и распределенная по поверхности ИШ. Нас в данном случае интересует второй случай. Для этого случая в работе [14] было сделано заключение о том, что границей влияния ИШ на  $Re_{кр}$  можно считать условие

$$\frac{U\delta}{\nu} = 120.$$

Сразу же обратим внимание на то, что это условие хорошо соответствует приведенной выше величине  $0,15R$ .

Важным моментом приведенных в работах [14, 15] результатов является четкое различие между турбулизацией, происходящей непосредственно за элементом ИШ и имеющей место на некотором расстоянии вниз по потоку. Очевидно, что лишь последний случай может рассматриваться в сопоставлении с турбулизацией потока в гладких каналах.

Авторам не известны прямые исследования структуры потока, турбулизированного за счет ИШ, которые были бы сопоставимы, например, с работой [7]. Поэтому, учитывая уже излагавшийся ранее анализ поведения теплоотдачи в этой области [1, 2], используем приводившиеся там результаты для подобного сопоставления.

Рассмотрим картину данных по теплоотдаче для работы [16]. В ней четко просматривается следующая закономерность. Осредненные линии для теплоотдачи гладкой трубы при различных числах Прандтля (черные) и для трубы с кольцевой накаткой (цветные линии) расположены подобным образом (рис. 7). Сдвиг между ними определяется изменением критического числа Рейнольдса. При больших числах Рейнольдса кривые с одинаковыми числами Прандтля имеют примерно одинаковый наклон, а затем с уменьшением числа Рейнольдса подобным образом убывают.



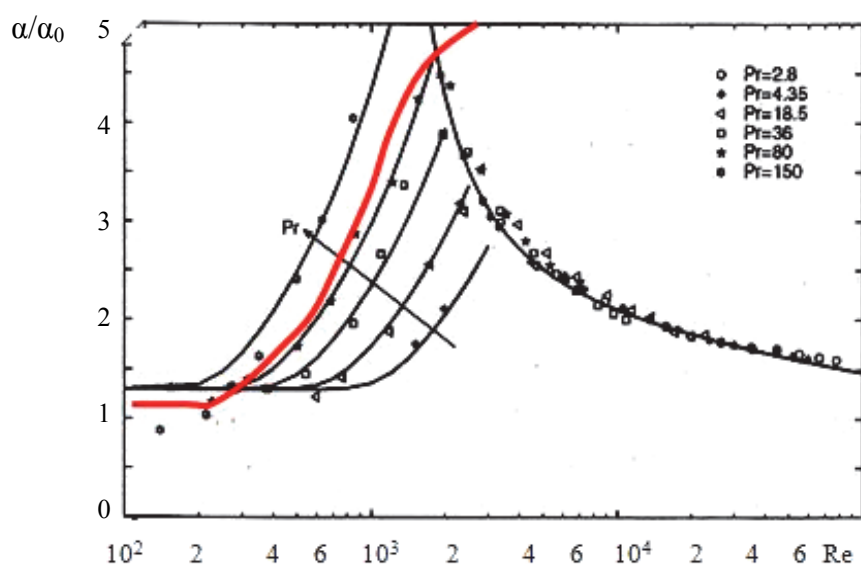


Рис. 6 – Относительная интенсификация теплоотдачи по результатам работы [10]:

— относительный коэффициент сопротивления

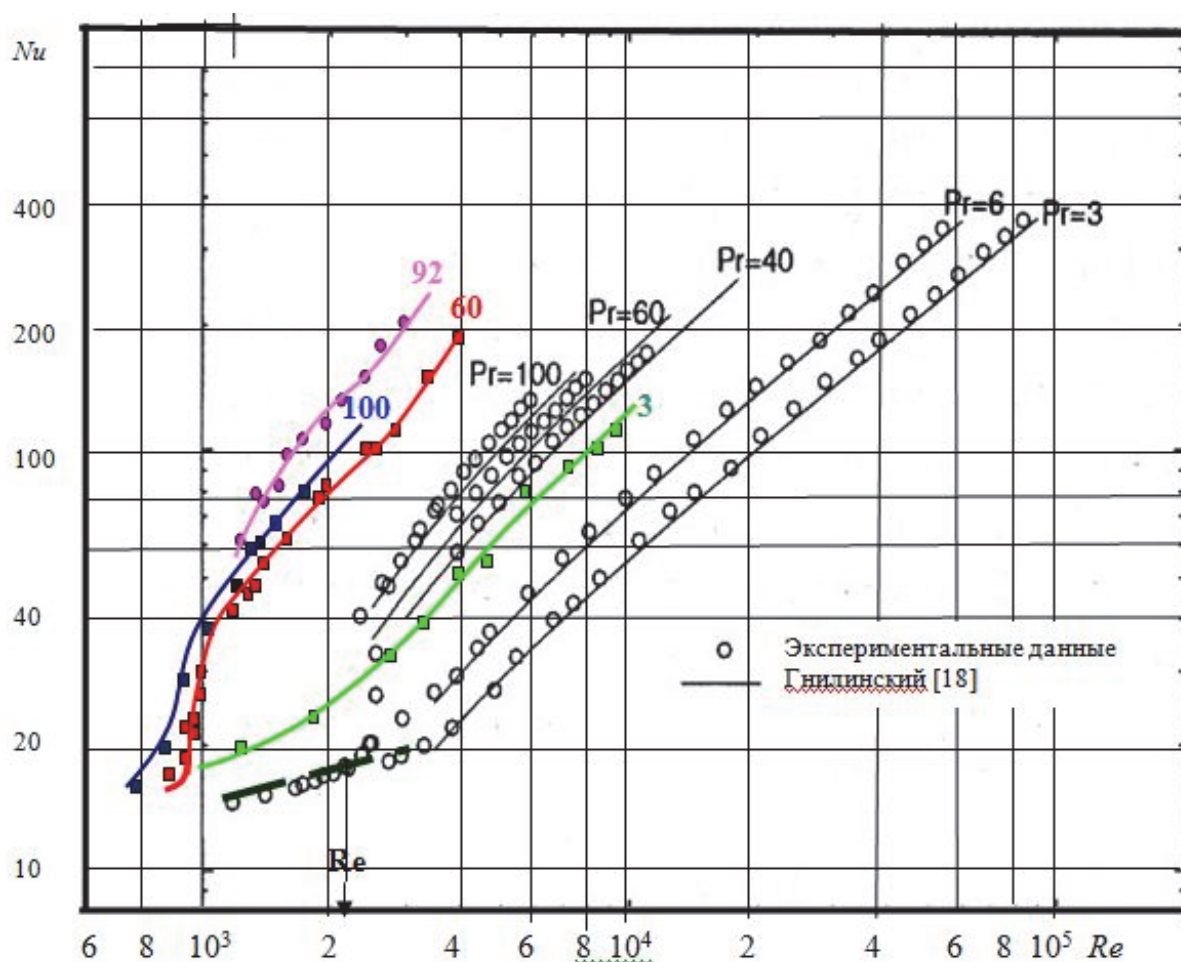
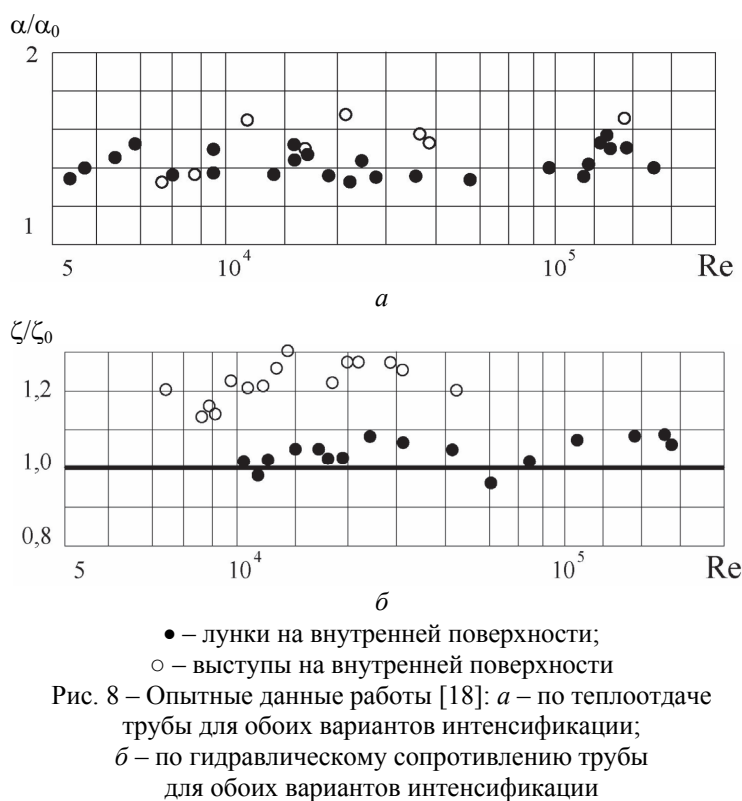


Рис. 7 – Кривые для теплоотдачи с опытными точками в турбулентной и переходной области для гладкой трубы (черные) и трубы со спиральной накаткой [16] (красные и синие), [17] (сиреневые) и [10] (зеленые)



В результате возникает мысль, что можно приблизительно определить ход кривых, используя данные по гидравлическому сопротивлению вплоть до перехода к ламинарному течению, данные по теплоотдаче при больших числах Рейнольдса для одного числа Прандтля и аппроксимирующие линии для переходной области, полученные для гладкой трубы. Аналогичным образом выглядят данные работы [17] для теплоотдачи трубы со спирально расположенными выступами, соответствующим лункам, расположенным на наружной поверхности труб. Кривая из этой работы для  $Pr = 92$  приведена на этом же рис. 7. В работах [1, 2] указанный анализ использовался для построения методики приближенной предварительной оценки эффективности использования ИШ в диапазоне переходных значений числа  $Re$  для теплоносителей с высокими числами  $Pr$ . Здесь мы обратим внимание на другую сторону вопроса – качественное соответствие двух упомянутых выше видов турбулизации. Из рис. 7 видно, что такое соответствие реально имеет место, если судить по опытным данным для теплоотдачи. Зависимость от чисел  $Re$  и  $Pr$  выступает здесь в роли своего рода индикатора.



Теперь обсудим следствия сделанного вывода. Итак, если масштаб ИШ достаточно велик, то турбулизация потока происходит раньше, чем в гладкой трубе и критическое значение числа  $Re$  уменьшается. Однако сам переход от ламинарного к турбулентному движению имеет характер, близкий к наблюдаемому для гладкой трубы. Что касается теплоотдачи, то картина перехода в зависимости от числа  $Pr$  соответствует изображенной на рис. 3. То есть относительно медленный рост с увеличением числа  $Re$  при малых числах Прандтля и резкий рост при высоких числах Прандтля.

Здесь необходимо снова упомянуть о сформулированном выше заключении о

том, что в рассматриваемых условиях зона генерации турбулентности оказывается в безразмерных координатах  $y^+$  ближе к стенке, чем для гладкой трубы. Это вполне согласуется с ситуацией, в которой турбулентность, близкая по своим характеристикам к возникающей в гладких трубах, возникает при заметно более низких значениях числа  $Re$ .

#### 4 Сопоставление данных по теплоотдаче и сопротивлению для систем идентичных сферических лунок и выступов

Хотелось бы здесь отметить еще одно интересное обстоятельство. Несколько лет назад (2005) нами были опубликованы результаты экспериментального исследования

теплоотдачи и сопротивления при течении воздуха в трубах с поверхностью, формованной регулярной системой мелких сферических лунок и сферических выступов с относительной глубиной (или высотой)  $h_d/d$  15 % и  $R/D = 0,03$  [18]. При таких масштабах никакие изменения  $Re_{кр}$ , естественно, не наблюдались. Но, результаты опытов показали довольно близкие значения интенсификации теплообмена и роста гидравлического сопротивления при турбулентном течении с числами  $Re > (15-20) \cdot 10^3$ . Это очень важно как для практики, так и для более глубокого исследования теплогидродинамических процессов в каналах с ИШ. Данные работы [18] позволяют проанализировать эффективность использования такого типа труб для теплообменников. Для жидкостей с высоким числом  $Pr$  опыты на олуненных поверхностях не проводились. Но с другой стороны, есть основания полагать, что эффекты интенсификации теплообмена при этом сохраняются. Это показывает сопоставление приведенное выше, а также результаты опытов на плоском канале, представленные в монографии [19].

### Выводы

1) В работе продемонстрированы причины повышения эффективности рельефов искусственной шероховатости, формируемых путем деформации поверхности трубы с помощью внешнего давления, с ростом числа Прандтля. Они связаны с изменением взаимного расположения зон генерации турбулентности за счет естественного перехода от ламинарного к турбулентному течению и за счет обтекания интенсифицирующего рельефа.

2) По поводу всех приведенных выше данных для интенсифицированных поверхностей можно отметить следующее. В последнее время большое внимание уделяется олуненным поверхностям как наиболее эффективному методу интенсификации теплообмена. С одной стороны, масштаб повышения теплоотдачи для олуненных поверхностей не превосходит достигаемого с помощью иных методов пристенной интенсификации теплообмена. С другой стороны масштаб снижения роста потерь давления при использовании олуненной поверхности действительно существенно ниже, если мы не превышаем некоторых разумных пределов по глубине лунок. Поэтому есть основания предполагать, что олуненные поверхности демонстрируют для сред с большими числами  $Pr$  высокую эффективность, поскольку для этих сред существенную роль играют ограничения по потерям давления.

**Список литературы:** 1. *Готовский, М. А.* Интенсификация теплоотдачи с помощью искусственной шероховатости при числах Рейнольдса, соответствующих ламинарному и переходному режимам и возможности ее практического использования [Текст] / М. А. Готовский // XVII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева. – Жуковский, 2009. – Т. 2. – С. 255–258. 2. *Gotovskiy, M.* Heat Transfer Enhancement by Artificial Roughness at Reynolds numbers Related with Laminar and Transitional Regimes for High-Viscous Liquids [Электронный ресурс] / M. Gotovskiy, S. Isaev // Proc. of IHTC-14. – Электрон. дан. (1 файл). – Washington, 2010. – докл. № 22303. – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. 3. *Hao, Li* Turbulent and transitional velocity measurements in a rectangular microchannel using microscopic particle image velocimetry / Li Hao, Randy Ewoldt, Michael G. Olsen // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2005. – No. 29. – P. 435–446. 4. *Kunen, J. M. G.* On the detection of coherent structures in turbulent flows: дис. ... д-ра / J. M. G. Kunen. – Delft University, 1984. 5. *Петухов, Б. С.* О теплоотдаче при турбулентном течении в трубах [Текст] / Б. С. Петухов, В. В. Кириллов // Теплоэнергетика. – 1958. – № 4. – С. 63–68. 6. *Gnielinski, V.* New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow [Text] / V. Gnielinski // Int. Chem. Eng. 1976. – Vol. 16. – P. 359–368. 7. *Corino, E. R.* A visual investigation of the wall region in turbulent flow [Text] / E. R. Corino, R. S. Brodkey // J. Fluid Mech. – 1969. – Vol. 37. – 1–30 c. 8. *Шлихтинг, Г.* Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1969. – 744 с. 9. *Калинин, Э. К.* Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с. 10. *Garcia, A.* Experimental study of heat transfer

enhancement with wire coil inserts in laminar- transition-turbulent regimes at different Prandtl numbers [Text] / A. Garcia, P.G. Vicente, A. Viedma // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 48. – P. 4640–4651. **11.** Eckhardt, B. Turbulence Transition in Pipe Flow. *Annu. Rev.* [Text] / B. Eckhardt, T. M. Schneider, B. Hof, J. Westerweel // *Fluid Mech.* – 2007. – 39:447–68. **12.** Rainieri, S. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop augmentation for laminar flow in spirally enhanced tubes [Text] / S. Rainieri, A. Farina, G. Pagliari // Preprint of Parma University, Department of Industrial Engineering, 1996. **13.** Nukuradse, J. Stromungsgesetze in Rauben Rohren [Text] / J. Nukuradse // *Forsshg. Arb. Ing.-Wes.* – 1933. – No 361. **14.** Faindt, E. G. Untersuchungen uber die Abhangigkeit des Umschlages laminat-turbulent von der Oberflachenrauigkeit und der Druckferteilung [Text] / E. G. Faindt // *Jb. 1956 Schiffbautechn.* – Gesellschaft, 1957. – V. 50. – P. 180–203. **15.** Dryden, H. L. Review of published data on the effect of roughness on transition from laminar to turbulent flow [Text] / H. L. Dryden // *JAS.* – 1953. – Vol. 20. – P. 477–482. **16.** Vicente, P. G. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers / P. G. Vicente, A. Garcia, A. Viedma // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – Vol. 47. – P. 671–681. **17.** Vicente, P. G. Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in helically dimpled tubes / P. G. Vicente, A. Garcia, A. Viedma // *Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2002. – Vol. 45. – P. 543–553. **18.** Бельнийкий, М. Я. Теплоотдача и сопротивление при течении в круглой трубе с интенсификацией регулярной системой сферических лунок и сферических выступов [Текст] / М. Я. Бельнийкий, М. А. Готовский, Б. С. Фокин // *Труды ЦКТИ.* – СПб, 2004. – Вып. 293. – С. 36–48. **19.** Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст]: в 5-ти томах. – ИТФ НАН Украины, 2005. – Т. 5. Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков. – 500 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Gotovskij, M. A. "Intensifikacija teplootdachi s pomoshh'ju iskusstvennoj sherohovatosti pri chislah Rejnol'dsa, sootvetstvujushhih laminarnomu i perehodnomu rezhimam i vozmozhnosti ee prakticheskogo ispol'zovanija." *XVII Shkola-seminar molodyh uchenyh i specialistov pod ruk. akad. RAN A.I. Leont'eva*. Vol. 2. Zhukovskij, 2009. 255–258. Print. **2.** Gotovsky, M., and S. Isaev. "Heat Transfer Enhancement by Artificial Roughness at Reynolds numbers Related with Laminar and Transitional Regimes for High-Viscous Liquids." *Proc. of IHTC-14*. No. 22303. Washington, 2010. CD-ROM. **3.** Hao, Li, Randy Ewoldt and Michael G. Olsen. "Turbulent and transitional velocity measurements in a rectangular microchannel using microscopic particle image velocimetry." *Experimental Thermal and Fluid Science* 29 (2005): 435–446. Print. **4.** Kunen, J. M. G. *On the detection of coherent structures in turbulent flows: dis. ... d-ra*. Delft University, 1984. Print. **5.** Petuhov, B. S., and V. V. Kirillov. "O teplootdache pri turbulentnom techenii v trubah." *Teplojenergetika* 4 (1958): 63–68. **6.** Gnielinski, V. "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow." *Int. Chem. Eng.* 16 (1976): 359–368. Print. **7.** Corino, E. R., and R. S. Brodkey. "A visual investigation of the wall region in turbulent flow." *J. Fluid Mech.* 37 (1969): 1–30. Print. **8.** Shlihting, G. *Teorija pograničnogo sloja*. Moscow: Nauka, 1969. Print. **9.** Kalinin, Je. K., G. A. Drejcer and S. A. Jarho. *Intensifikacija teploobmena v kanalah*. Moscow: Mashinostroenie, 1990. Print. **10.** Garcia, A., P.G. Vicente and A. Viedma. "Experimental study of heat transfer enhancement with wire coil inserts in laminar- transition-turbulent regimes at different Prandtl numbers." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005): 4640–4651. Print. **11.** Eckhardt, B., et al. "Turbulence Transition in Pipe Flow. *Annu. Rev.*" *Fluid Mech.* 2007. – 39:447–68. **12.** Rainieri, S., A. Farina and G. Pagliari. "Experimental investigation of heat transfer and pressure drop augmentation for laminar flow in spirally enhanced tubes." *Preprint of Parma University, Department of Industrial Engineering*, 1996. Print. **13.** Nukuradse, J. "Stromungsgesetze in Rauben Rohren." *Forsshg. Arb. Ing.-Wes.* 361 (1933). Print. **14.** Faindt, E. G. "Untersuchungen uber die Abhangigkeit des Umschlages laminat-turbulent von der Oberflachenrauigkeit und der Druckferteilung." *Jb. 1956 Schiffbautechn.* No. 50. Gesellschaft, 1957. 180–203. Print. **15.** Dryden, H. L. "Review of published data on the effect of roughness on transition from laminar to turbulent flow." *JAS* 20 (1953): 477–482. Print. **16.** Vicente, P. G., A. Garcia and A. Viedma. "Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004): 671–681. Print. **17.** Vicente, P. G., A. Garcia and A. Viedma. "Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in helically dimpled tubes." *Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002): 543–553. Print. **18.** Belen'kij, M. Ja., M. A. Gotovskij and B. S. Fokin. "Teplootdacha i soprotivlenie pri techenii v krugloj trube s intensifikaciej regul'arnoj sistemoj sfericheskikh lunok i sfericheskikh vystupov." *Trudy CKTI*. No. 293. SPb, 2004. 36–48. Print. **19.** Halatov, A. A. *Teploobmen i gidrodinamika v poljah centrobezhnyh massovyh sil. T. 5. Teploobmen i teplogidravlicheskaja jeffektivnost' vihrevykh i zakruchennykh potokov*. Kiev: ITF NAN Ukrainy, 2005. Print.

Поступила (received) 11.02.2014